

항공 정찰용 Step-stare 영상획득 시스템 설계

Design of the Step-stare Image Gathering System for an Aerial Reconnaissance

백운혁^{1,✉}, 박재영¹, 안정훈¹, 이정석¹
Woonhyuk Baek^{1,✉}, Jaeyoung Park¹, Junghun Ahn¹, and Jungsuk Lee¹

¹ 삼성탈레스 메카트로닉스 그룹 (Mechatronics Group, Samsung Thales Co., Ltd.)
✉ Corresponding author: woonhyuk.baek@samsung.com, Tel: +82-31-8020-7577

Manuscript received: 2014.5.15 / Revised: 2014.6.30 / Accepted: 2014.7.1

This paper presents design and performance validation of a method for motion compensation using fast steering mirror. First of all, the schematics of the Electro Optical/Infra-Red (EO/IR) and step-stare image gathering system for an aerial reconnaissance are introduced. Because of the steering mirror with low inertia so called Back scan mechanism (BSM), the fast step-stare image gathering technique that is required for taking a high-definition still image will be realized. After then, the BSM hardware includes motors and feedback sensors are introduced. Also, the motion profile for BSM will be designed to compensate roll scan motion of the gimbals. At the end of this paper, designed profile and tracking performance of the EO/IR system with BSM will be validated through experiments.

Key Words: Aerial Reconnaissance System (항공 정찰 시스템), Fast Steering Mirror (고속 스티어링 미러), Step-Stare Image Gathering (스텝 스테어 영상획득), EO/IR System (전자광학 적외선 장비), Gimballed System (김발 시스템)

기호설명

P_{cmd} = angle position command
 T_d = torque disturbance
 ω_d = angular velocity disturbance
 Z_{LEAD} = zeros of lead compensator
 P_{LEAD} = poles of lead compensator
 Z_{LAG} = zeros of lag compensator
 K_{GAIN} = final gain of controller
 ζ = damping coefficient
 T = sampling time of discrete controller
 ω_{CMD} = angular velocity command for Back scan

mechanism

ω_B = angular velocity for back scanning(compensation of roll motion)

1. 서론

항공 정찰 시스템은 적의 동태 및 전력을 예측하여 전쟁을 방지하고, 전시에 전술적으로 유리한 위치를 확보하기 위해 오늘날 그 중요도가 날로 높아지고 있다.¹ 해외에서는 이미 수십 년 전부터 Global Hawk와 같은 고성능의 무인 정찰기를 개발하여 운용 중에 있고, 국내에서도 2002년 전자광

학 추적장비(EOTS: Electro-optical tracking system)를 탑재한 군단급 무인항공기를 개발하여 운용 중에 있다.^{2,3}

육·해·공의 다양한 분야에서 운용되는 군사용 영상 촬영 시스템 중에서도 특히 항공기에 탑재되는 영상 촬영 장비는 매우 가혹한 환경에서 운용된다. 군사용 정찰기의 운용고도는 최고 수 만 피트 이하이기 때문에 여기에 탑재되는 장비는 고도 변화에 따른 환경 조건을 모두 만족해야 한다. 가혹한 온도 변화와 비행체 및 외부 요인에 의해 발생하는 진동 및 충격 조건에서 운용하기 위해 높은 수준의 신뢰성을 확보해야만 하고, 이러한 상황에서도 선명한 영상을 획득할 수 있어야 한다.⁴ 항공기에 탑재되는 영상 촬영 시스템에서 영상의 품질은 검출기, 광학계, 영상처리 기술 등 많은 요소가 복합적으로 작용하여 결정된다. 하지만 이러한 요소들 중에서도 강한 진동이 있는 환경에서 시선의 흔들림을 최소화하여 영상 번짐을 막는 시선 안정화 기술이 고품질 영상획득을 위한 핵심 기술이라고 할 수 있다. 이러한 고성능의 시선 안정화 기술을 구현하기 위해 현재 개발되고 있는 대부분의 항공기용 영상 촬영 시스템은 다축 gimbal 구조를 채택하고 있다.^{1,5}

고해상도 영상 획득을 위해 높은 배율의 고성능 카메라를 탑재함에 따라 시스템의 크기와 무게가 증가하고, 고정밀의 시선 안정화 제어기술이 요구된다. 고배율 영상의 시선(LOS: Line of sight) 이동과 흔들림을 막기 위한 높은 수준의 구동제어 기술과 고효율/고정밀 구동기가 필요하고, 이는 개발 비용의 증가로 이어진다. 따라서 최근에는 gimbal 플랫폼 내부에 LOS 이동을 위한 Steering mirror와 같은 소형 플랫폼을 추가로 광학계 내부에 설치하여, 빠른 응답특성 및 정밀 구동특성을 갖는 방법이 많이 적용되고 있다.⁶⁻⁸

본 논문에서는 항공기에 탑재되어 고해상도의 광역 정찰 영상 획득이 가능한 Step-stare 영상 획득 시스템을 소개하고, 카메라의 구동과 시선 안정화를 위한 3축 gimbal 시스템을 설계한다. 구동 시스템 제어를 위한 구동 제어기 및 시선 안정화 제어기를 설계하여, 실제 항공기 외란 조건하에서 그 성능을 검증하였다. 또한, 고품질의 정지영상 촬영을 위해 gimbal 움직임을 보상할 수 있도록 광학계 내부에 Back scan mechanism(BSM)을 설치하고, 이를 위한 구동 프로파일을 설계한다. 마지막으로 3축 gimbal과 BSM을 적절하게 제어하여 고품질의

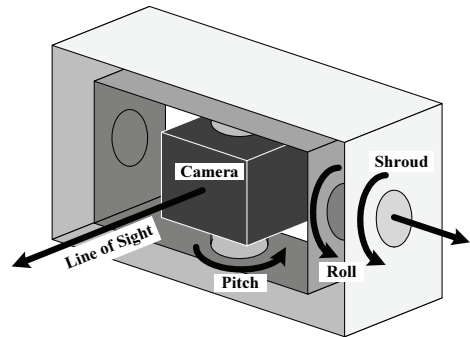


Fig. 1 Structure of a 3-axis gimbaled system

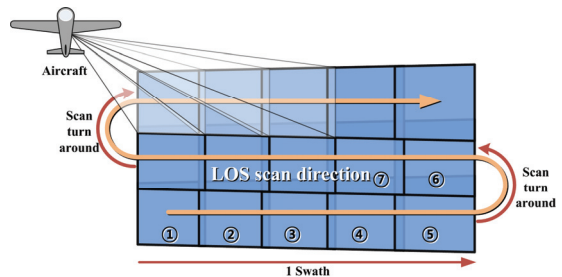


Fig. 2 Step-stare image gathering sequence

정지영상을 획득하는 실험을 통해 설계된 Step-stare 영상 획득 시스템의 성능을 검증한다.

2. Step-stare 영상 획득 시스템 설계

2.1 Step-stare 영상 획득 개념

본 논문에 소개되는 항공기용 전자광학적외선 장비(EO/IR: Electro-optical / Infrared)는 Roll, Pitch, Shroud의 3축 gimbal과 BSM으로 구성되어 있다. Shroud는 Roll에 대한 종속 구동을 하고, Roll과 Pitch는 내부 카메라 시선을 제어하는 gimbal로써 LOS 구동 제어 및 외란에 대한 시선 안정화를 담당한다. Fig. 1은 3축 gimbal의 구조를 나타낸다.

정지영상을 촬영하는 전자광학적외선장비는 Fig. 2에서 보는 것과 같이 정찰지역 촬영을 위해 ①, ②, ③,... 순서로 촬영을 한다. 이때, EO/IR의 Roll/Shroud는 ① ~ ⑤번 영상을 촬영하는 동안 등속으로 구동하고, ⑥번 영상 촬영 전에 구동방향을 전환하여(Scan turn around) 반대 방향으로 등속 구동한다. 촬영 후에 각각의 촬영한 영상을 좌표를 기반으로 정합하여 목표 지역의 영상을 획득한다. 촬영된 영상의 정합을 위하여 매 Frame마다 촬영하는 영상 중심점의 좌표를 계산한다.

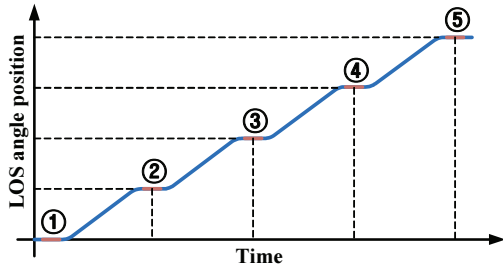


Fig. 3 LOS angle position for image acquisition

고품질 영상 획득을 위해서는 매 촬영 시 카메라 노출 시간 동안 LOS를 고정해주어야 한다. 이때, 영상을 초당 수 장의 빠른 속도로 촬영하면서 관성모멘트가 큰 짐발을 Step-stare 구동하려면 고풍력의 구동기가 필요하고, 이는 구동기의 무게 및 크기, 그리고 개발 비용의 증가를 야기한다. 이를 개선하는 방안으로 광학계 내부에 Steering mirror를 설치하여 LOS를 변화시키는 방법을 제안하고자 한다.

BSM 이라고 불리는 Steering mirror 제어 장치는 광학계 내부의 광학 축 위에 존재하며, LOS를 변화시킬 수 있는 반사경으로 구성된다. Step-stare 영상획득 시스템을 이용하여 Fig. 2의 ①, ②, ③, ④, ⑤지역을 고해상도로 촬영하기 위한 Roll 축 LOS의 변화는 Fig. 3과 같다. 매 프레임 촬영 노출 시간 동안 Fig. 3과 같이 LOS가 고정되어야 고품질의 영상 획득을 할 수 있다. 이때, LOS가 고정되지 않고 움직이게 되면 획득된 영상의 선예도(Sharpness)가 떨어져 영상의 품질이 저하되는 문제가 있다. 그렇기 때문에 Fig. 2의 ①, ②, ③, ④, ⑤ 지점의 영상을 획득하는 노출시간 동안 LOS가 한 지점에 고정되도록 Roll 짐발과 BSM의 적절한 제어가 이루어져야 한다.

2.2 짐발 시스템

3축 짐발 시스템은 Roll, Pitch, 그리고 Roll 축에 대하여 종속적으로 구동하는 Shroud로 구성된다. Roll, Pitch 두 개의 축으로 구성된 내부 짐발은 카메라 조립체를 지지하는 역할과 더불어 외부의 진동이나 떨림 등의 외란이 카메라 내부까지 도달하지 못하도록 방지하는 역할을 한다. 외란 제거는 수동형 방식과 능동형 방식으로 나눌 수 있다. 수동형 방식은 방진구와 같은 고주파 차단 주파수 특성을 가진 기구물을 이용하여 수행하고, 능동형 방식은 Gyroscope 와 같은 관성센서를 이용하여

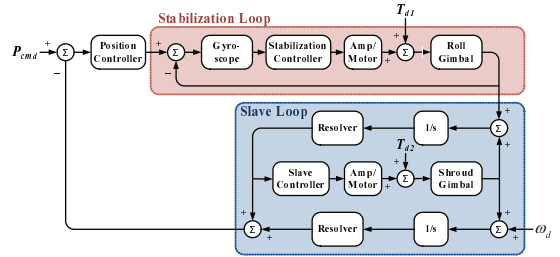


Fig. 4 Control block diagram of roll and shroud gimbals

외란을 측정후, 시선 안정화 제어기를 통해 내부 짐발 모터를 구동하여 측정된 외란을 상쇄한다. 외부의 Shroud 짐발은 Roll 구동축과 동일한 축에서 Roll 짐발을 추종하여 구동한다.

2.2.1 안정화 짐발 설계

Roll 짐발과 종속 Loop 인 Shroud 짐발의 제어 블록도 구성은 Fig. 4에서 자세히 살펴볼 수 있다. Fig. 4은 Roll/Shroud 짐발에 대해서만 표현한다. 내부에 위치하여 시선 안정화를 담당하는 Roll 짐발은 Gyroscope를 이용하여 외부에서 이입되는 외란을 측정하고, 안정화 제어기를 통해 Amp/Motor를 구동하여 전자광학장비의 시선 흔들림을 억제하는 기능을 수행한다. 이를 통해 항공기 기체의 흔들림이나 여타 다른 장비로 인한 진동을 제거하여 카메라의 LOS를 안정화시킨다. 또한 Shroud 짐발은 Roll 짐발과 Shroud 짐발의 상대 각도를 Resolver를 통해 측정하여 상대각도가 0°가 되도록 제어된다. 이 같은 과정을 통해 Shroud 짐발은 Roll 짐발의 움직임에 종속되어 구동한다.

3축 짐발 시스템을 구성하고 있는 하드웨어는 다음과 같다. 우선 내부의 Roll, Pitch 짐발은 회전축 양단에 동일한 사양의 모터를 배치하는 Dual motor 구동기로 구성한다. 이와 같이 하나의 회전축에 동일한 모터를 Dual로 배치하여 사용함으로써, (1)카메라 조립체 양단의 무게 균형을 맞추어 불필요한 무게더미를 제거함으로써 전체 시스템의 무게를 감소시키고, (2)회전부의 동력균형을 맞추어 구동 안정성을 증가시키며, (3)용량이 작은 소형 모터 구동 드라이버를 사용하여 모터를 구동함으로써 효율적인 에너지 소비를 할 수 있게 된다. 내부의 Roll, Pitch 짐발은 구동범위가 크지 않기 때문에 일정 각도만 회전하는 Limit angle torque motor(LAT)를 사용하고, Roll 짐발에 종속되어 구동되는 Shroud 짐발은 카메라 조립체를 포함한 외부

김발 전체를 구동해야 하기 때문에 큰 토크를 낼 수 있도록 Brushless DC모터와 기어박스를 사용하여 구성한다. 김발의 구동 각도를 측정하기 위한 위치센서는 Roll, Pitch, Shroud 구동축에 각각 Dual speed resolver(1/16x)를 사용하고, 시선 흔들림을 감지하여 시선안정화 기능 수행과 시선 이동 속도 제어에 위해 정밀한 Dynamically tuned gyroscope(DTG)를 사용한다.

2.2.2 시선 안정화 제어기 설계

안정화 제어기는 외부에서 장비에 인가되는 외란을 측정하고, 측정된 값을 기반으로 모터를 구동시켜 인가되는 외란을 제거함으로써 시선을 안정화 시킨다. 본 논문에서 카메라 조립체에 고정되어있는 Gyroscope를 통해 각속도 외란을 측정하고, 측정된 값은 안정화 제어기의 입력으로 받는다. 안정화 제어기에서 계산된 제어기 출력이 모터 구동 전류 명령으로 Amp에 인가되고, Amp를 통해 모터가 구동된다. 안정화 제어기 하드웨어는 Digital signal processor(DSP)를 이용하여 구성하고, 안정화 제어기 소프트웨어는 제어 알고리즘과 Digital 필터로 이루어져 있다. 시선 안정화 제어기는 동적 보상기를 사용하여 전체 시스템이 Type III가 되도록 설계한다.⁹ 제어기 구조는 식(1)과 같다. 진상 보상기(Lead compensator)를 이용하여 이득여유(Gain margin)와 위상여유(Phase margin)를 확보하고, 지상 보상기(Lag compensator)에서 직류 게인을 증대시키며, 마지막으로 최종 게인을 조정하여 제어기를 튜닝한다.

$$G(s) = \frac{s + Z_{LEAD}}{s + P_{LEAD}} \frac{s + Z_{LAG}}{s} K_{GAIN} \quad (1)$$

또한, 본 장비에서 사용한 DTG는 기계식 Gyroscope로 내부 회전체에 의한 자체 공진이 크게 발생하는데, 이를 제거하기 위하여 Notch Filter를 설계하여 적용한다.¹⁰ 본 논문에서는 다음 식(2)와 같이 2차 시스템으로 Filter를 설계한다.

$$G(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

여기서 ω_n 은 제거하고자 하는 주파수이다.

위 제어기와 필터는 식(3)의 Bi-linear 변환식으로 이산화하여 DSP에 적용한다.

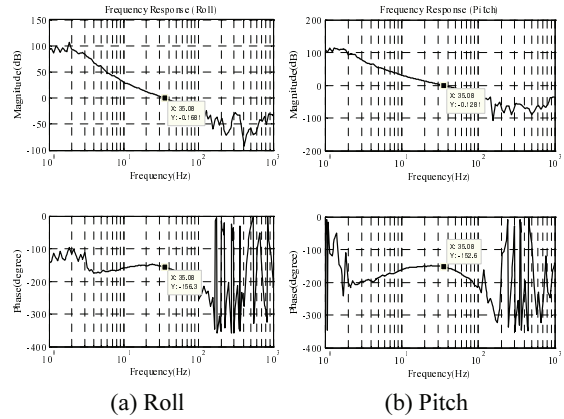


Fig. 5 Open-loop frequency response

$$s = \frac{2(1 - z^{-1})}{T(1 + z^{-1})} \quad (3)$$

여기서 T 는 샘플링 타임이다.

시스템의 주파수 응답은 Dynamic signal analyzer(DSA)를 사용하여 측정한다. 측정된 개루프 주파수 응답 선도를 이용해서 Crossover 주파수가 35Hz가 되도록 안정화 제어기 게인을 결정한다. 최종 튜닝한 시스템의 Phase margin은 Roll 김발의 경우 약 24도이고, Pitch 김발의 경우 약 28도이다. 아래 Fig. 5에서 시험을 통해 측정된 Roll 김발과 Pitch 김발의 주파수 응답을 확인할 수 있다.

2.2.3 안정화 성능

설계된 안정화 김발 시스템의 성능 확인을 위하여, 항공기용 가진 프로파일을 구성하여 진동 시험을 수행하고, 진동 외란이 인가될 때의 시선 흔들림 양을 계측한다. 시선의 흔들림은 장비의 안정화 기능이 동작될 때, Gyroscope의 출력을 이용하여 측정한다. X, Y, Z의 3축 방향으로 각각 진동을 가한 후 영상 품질에 영향을 미치는 1~100Hz 대역의 성분의 Power spectral density(PSD)를 측정하여 계산한다.

측정된 데이터는 Fig. 6에서 보는 것과 같고, 이를 Gyroscope의 Scale factor를 이용하여 LOS가 흔들린 각도로 환산할 수 있다. 측정 결과, X축, Y축, Z축의 방향 진동에 대하여 모두 0 μ rad 이내의 안정화 정확도를 보인다.

2.3 Back scan mechanism 설계

Back scan mechanism(BSM)은 광학계 내부에 소

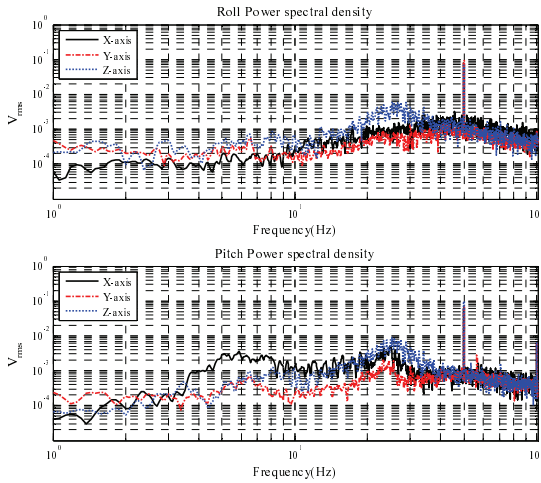


Fig. 6 Stabilization accuracy (PSD)

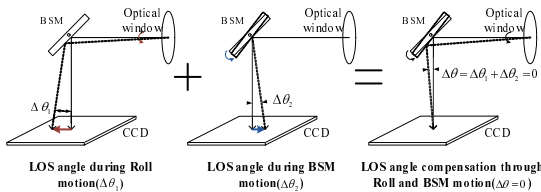


Fig. 7 Schematics of BSM

형 Steering mirror를 설치하여 LOS를 제어함으로써, 적은 무게 및 비용으로 빠른 응답 특성을 확보하는데 그 목적이 있다.

2.3.1 BSM 구동 개념

BSM 구동기는 임무지역 촬영을 위한 Roll gimbal 스캔 구동 시 스캔 모션을 보상함으로써 영상 촬영이 진행되는 노출 시간 동안 LOS를 고정시키는 역할을 한다. Fig. 7은 Roll 스캔 움직임에 의해 발생하는 LOS 흐름($\Delta\theta_1$)을 BSM의 구동($\Delta\theta_2$)을 이용하여 상쇄되는 개념을 보여준다.

Step-stare 구현을 위한 Fig. 3의 LOS 흐름을 만들어 내기 위한 BSM 프로파일을 Fig. 8과 같이 설계하여, 등속운동을 하는 Roll gimbal의 움직임을 BSM을 이용하여 보상한다. Roll gimbal의 움직임과 BSM의 움직임이 더해져 최종 LOS는 Step-stare를 구현하게 된다.

2.3.2 BSM 하드웨어

BSM 구동기는 구동을 위한 모터와 위치 측정을 위한 센서로 구성된다. 모터는 BSM에 장착된

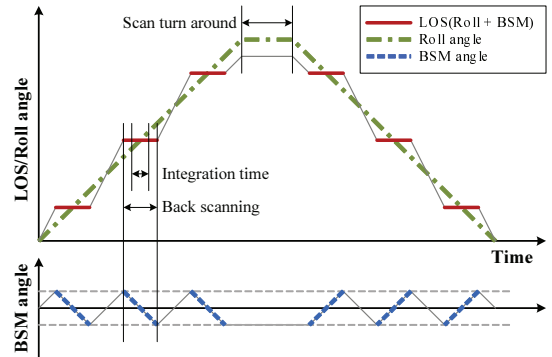


Fig. 8 Roll gimbals and BSM profiles for step-staring

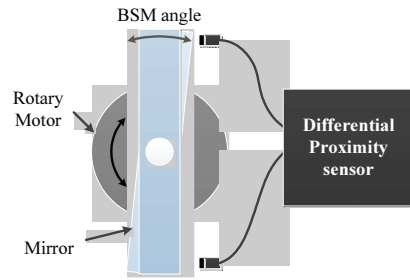


Fig. 9 Hardware configurations of BSM

Steering mirror의 크기가 작고 필요 토크가 높지 않기 때문에, 일반적으로 많이 사용되는 소형 BLDC 모터를 선정한다. 또한, BSM은 미세 구동이 LOS의 변화에 직접 영향을 미치기 때문에 정밀구동제어가 요구된다. 이때, 위치오차 요구사항은 일반적으로 iFOV(Instantaneous Field of View, pixel당 각도) 내에서 결정된다. 본 논문에서 사용된 장비의 요구사항은 $0.1\mu\text{rad}$ 이내로, 일반적인 광학식 회전 엔코더나 Resolver 등의 센서로는 규격 만족이 어렵다. 그렇기 때문에 측정 범위는 작지만 분해능과 정밀도가 높은 근접센서(Proximity sensor)를 사용하여 각도를 추정한다.⁸ Fig. 9는 BSM의 하드웨어 구성을 나타낸다.

2.3.3 BSM 구동 프로파일 설계

Roll gimbal의 스캔 구동 동안 LOS 흐름을 상쇄하여 LOS를 고정시키기 위해서는 BSM의 구동 프로파일 설계가 매우 중요하다. BSM의 구동프로파일을 설계하기 위한 가정은 다음과 같다.

- (1) gimbal은 시선안정화 제어를 통해 외란을 완전히 제거하고,
- (2) 촬영 중 Roll gimbal의 구동속도는 항상 일정하다.

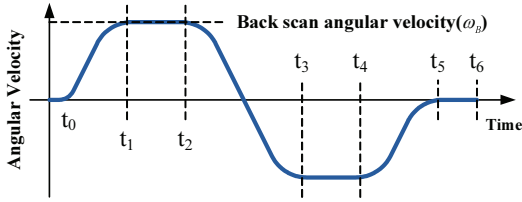


Fig. 10 BSM angular velocity profile

위의 가정을 토대로 급격한 각 가속도의 변화가 발생하지 않도록 Fig. 10과 같이 삼각함수를 이용하여 각속도 프로파일을 설계한다. 각 구간별 각속도 프로파일 수식은 식(4) ~ 식(9)에서 볼 수 있다. 설계된 각속도 프로파일을 적분하여 각도 프로파일을 설계한다.

$$t_0 \sim t_1 : \omega_{CMD} = \frac{\omega_B}{2} \left(1 - \cos\left(\frac{t-t_0}{t_1-t_0}\pi\right) \right) \quad (4)$$

$$t_1 \sim t_2 : \omega_{CMD} = \omega_B \quad (5)$$

$$t_2 \sim t_3 : \omega_{CMD} = \omega_B \cos\left(\frac{t-t_2}{t_3-t_2}\pi\right) \quad (6)$$

$$t_3 \sim t_4 : \omega_{CMD} = -\omega_B \quad (7)$$

$$t_4 \sim t_5 : \omega_{CMD} = -\frac{\omega_B}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{t-t_4}{t_5-t_4}\pi\right) \right) \quad (8)$$

$$t_5 \sim t_6 : \omega_{CMD} = 0 \quad (9)$$

2.3.4 BSM 구동 성능

위에서 생성된 구동 프로파일을 이용하여 BSM 구동기의 성능을 시험한다. Fig. 11은 BSM 구동기의 위치 프로파일 추종 성능 그래프이다. 추종 위치 오차는 최대 0.001rad, 실제 영상 노출이 이루어지는 $t_1 \sim t_2$ 구간에서는 위치오차 0.001rad 이내, 속도오차 0.001mrad/s 이내이다.

BSM 구동을 통한 LOS 고정 효과는 Fig. 12에서 확인할 수 있다. 실험실에 설치되어 있는 시준기(Collimator)를 사용하여 USAF(United States Air Force) 타겟의 촬영영상을 획득하여 확인한다. Fig. 12(a)는 BSM 구동 없이 촬영한 영상이고, Fig. 12(b)는 BSM 구동으로 LOS를 고정하여 촬영한 영상이다. 영상에서 확인할 수 있듯이, BSM을 구동시키지 않았을 경우에는 노출 시간 동안 LOS가 변화

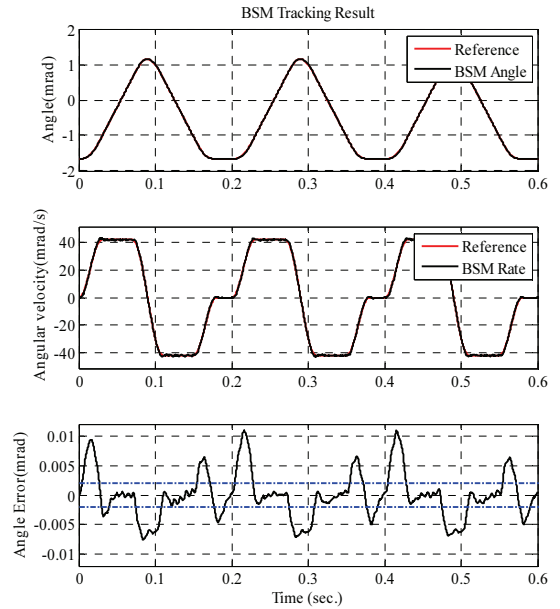


Fig. 11 BSM control performance

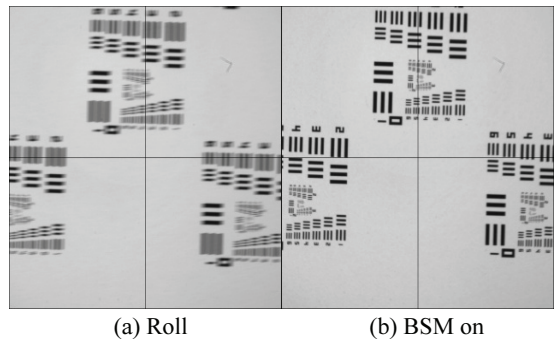


Fig. 12 Image motion compensation using BSM

하기 때문에 영상의 품질이 저하되는 결과를 보이고, BSM을 구동하여 LOS를 고정시킨 경우에는 LOS가 고정되어 선명한 영상을 획득할 수 있다.

2.4 영상 획득 시험 결과

Roll 스캔 구동 시 정지 영상 촬영 성능 검증을 위해 시준기 표적을 바라보면서 Step-stare 영상 획득 기법을 사용하여 여러 장의 정지영상을 촬영한다. Fig. 13는 영상 촬영 중에 획득한 Roll 김발의 스캔 구동 각도 및 BSM의 각도와 LOS의 움직임을 함께 나타낸 것이다. Roll 김발 각도와 BSM 구동각도의 합이 LOS의 움직임으로 나타나는 것을 확인할 수 있으며, LOS가 고정되어 있는 시점에

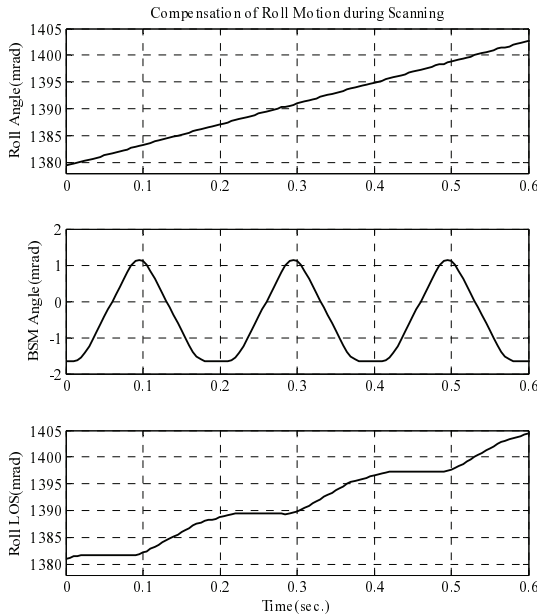


Fig. 13 Step-stare motion control performance

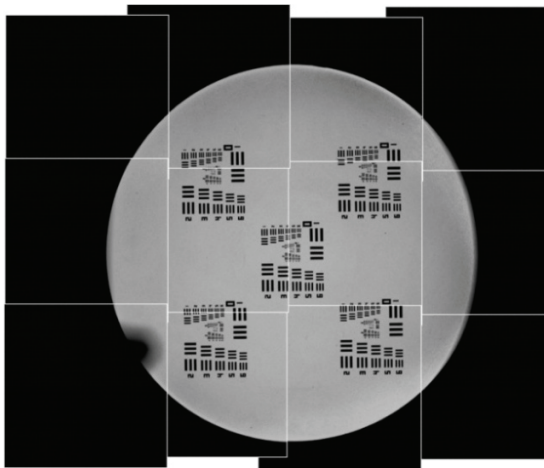


Fig. 14 Step-stare image gathering result

노출이 발생하도록 카메라를 제어함으로써, 고품질 영상을 획득할 수 있음을 알 수 있다.

Step-stare 영상 획득 기법을 통해 촬영한 영상은 Fig. 14에서 볼 수 있다. 작은 영역을 촬영한 여러 장의 정지영상을 좌표를 기준으로 정합하여 한 장으로 구성하면 Fig. 14와 같은 영상을 획득할 수 있다. 이와 같이 Step-stare 기법을 사용하여 획득한 사진을 여러 장 이어 붙임으로써, 고해상도의 광역 정찰 영상 획득이 가능하다.

3. 결론

본 논문에서는 고 배율의 항공기용 EO/IR 장비에서 고품질 영상 획득을 위해 광학계 내부에 Steering mirror를 장착하여 이를 정밀 제어함으로써 LOS 변화를 보상하는 방법을 제시하였다. Steering Mirror를 포함한 BSM을 구현함으로써 기존의 고 배율 고성능 카메라보다 시선 변화 시스템의 무게가 감소되고, 보다 빠르게 LOS 변경 및 유지가 가능한 Step-stare 영상획득 시스템을 구성하였다. 구성된 시스템을 이용하여 실험실 환경에서 시준기의 USAF 타겟을 촬영함으로써 Step-stare 영상획득 시스템의 성능을 실험적으로 검증하였다.

REFERENCES

1. Korea Defense Industry Association, "Information Warfare between Reconnaissance Aircraft," Defense and Technology, No. 284, pp. 55-61, 2002.
2. Held, K. J. and Robinson, B. H., "Tier II Plus Airborne EO Sensor LOS Control and Image Geolocation," Proc. of the IEEE on Aerospace, pp. 377-405, 1997.
3. Defense Agency for Technology and Quality, <http://www.dtaq.re.kr/board-read.do?boardId=weapon4&boardNo=126077207684314&command=READ&page=1&categoryId=-1> (Accessed 7 July 2014)
4. MIL-STD, "MIL-STD-810G: Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests," Department of Defense, United States of America, 2008.
5. Park, J. K., "Design and Its Application of Disturbance Observer for Image Stabilization System," Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, 2009.
6. Choi, Y. J. and Kang, M. S., "Dual Stage Servo Controller for Image Tracking System," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 24, No. 2, pp. 86-94, 2007.
7. DeBruin, J. C., "Derivation of Line-of-Sight Stabilization Equations for Gimbaled-Mirror Optical Systems," Proc. of the SPIE on Active and Adaptive Optical Components, Vol. 1543, pp. 236-247, 1991.
8. Kaman Precision Products, "Kaman Application Note: Mirror Steering," http://www.kamansensors.com/app_notes/Kaman_Mirror_Steering_App_Note_

web.pdf (Accessed 7 July 2014)

9. Franklin, G. F., Powell, J. D., and Emami-Naeini, A., "Feedback Control of Dynamic Systems," Pearson Education Korea, pp. 343-353, 1995.
10. Ellis, G., "Control System Design Guide," Elsevier Academic Press, 3rd Ed., pp. 180-182, 2004.